

Pronóstico de Emisiones de CO_2 per cápita en el Reino Unido

Jorge Guijarro

Tecnológico de Monterrey, Campus Guadalajara

08/06/2024

1 INTRODUCCIÓN

El cambio climático es uno de los retos más urgentes a nivel global y está directamente vinculado al Objetivo de Desarrollo Sostenible 13 (ODS 13) de la Agenda 2030: “Adoptar medidas urgentes para combatir el cambio climático y sus efectos”. Para poder medir nuestro progreso como sociedad hacia lograr este objetivo, es indispensable contar con indicadores claros y comparables que nos permitan saber si vamos en buen camino para lograr estos objetivos. Para ello se ha elegido las emisiones de CO_2 per cápita como indicador principal para medir el progreso de este objetivo, ya que muestra la huella promedio de carbono de cada habitante y facilita la comparación entre países de distinto tamaño o nivel de desarrollo.

En concreto, nos hemos centrado en la serie histórica de emisiones de CO_2 (toneladas) de Reino Unido, que en comparación con muchos otros países desarrollados, destaca por su significativa reducción de emisiones de CO_2 en los últimos años gracias a sus políticas actuales de impuestos al carbono, cierre de plantas de carbón, despliegue de renovables, etc. Estos datos nos permiten identificar tendencias a largo plazo, evaluar el impacto de políticas energéticas y ambientales y anticipar escenarios futuros.

2 EXTRACCIÓN Y LIMPIEZA DE LOS DATOS

Para la obtención de los datos se siguieron los siguientes pasos:

1. **Visitar** <https://ourworldindata.org/co2-and-greenhouse-gas-emissions>
2. **Navegar** a la sección de “*Data*” y localizar la tabla de “*Annual CO₂ emissions (per capita)*”.
3. **Filtrar** por país: en el cuadro de búsqueda de la tabla, escribir “*United Kingdom*”.
4. **Descargar**
 - Hacer clic en el botón de descarga de datos (*Download*).
 - Seleccionar “*CSV*” para el conjunto filtrado.

Como parte del procesamiento, luego de cargar la base de datos, únicamente se ha modificado el nombre de la variable "Annual CO₂ emissions (per capita)" por "emissions_per_capita" para un mayor entendimiento de los datos.

Estructura Resultante:

Year	Entity	Emissions per Capita
1850	United Kingdom	4.489172
1851	United Kingdom	4.252994
1852	United Kingdom	4.2159934
1853	United Kingdom	4.167399
1854	United Kingdom	4.9915624

Table 1. Emisiones per cápita en el Reino Unido (1850–1854)

3 ANÁLISIS EXPLORATORIO

Revisión de valores faltantes

Confirmamos que no había ningún dato ausente en ninguna de las columnas. Al no existir valores faltantes, no fue necesario aplicar ningún método para tratar el problema.

Estadísticas Descriptivas

Table 2. Estadísticas descriptivas de emisiones de CO₂ per cápita

Estadístico	Valor
count	174.00
mean	9.0898
std	1.9289
min	4.1674
25%	8.1557
50%	9.7165
75%	10.4383
max	11.8158

El dataset contiene 174 observaciones, con una media de 9.09 t/persona y una desviación estándar de 1.93.

Los valores van desde 4.17 hasta 11.82, y los percentiles muestran que el 50% de los datos queda entre 8.16 y 10.44 t/persona.

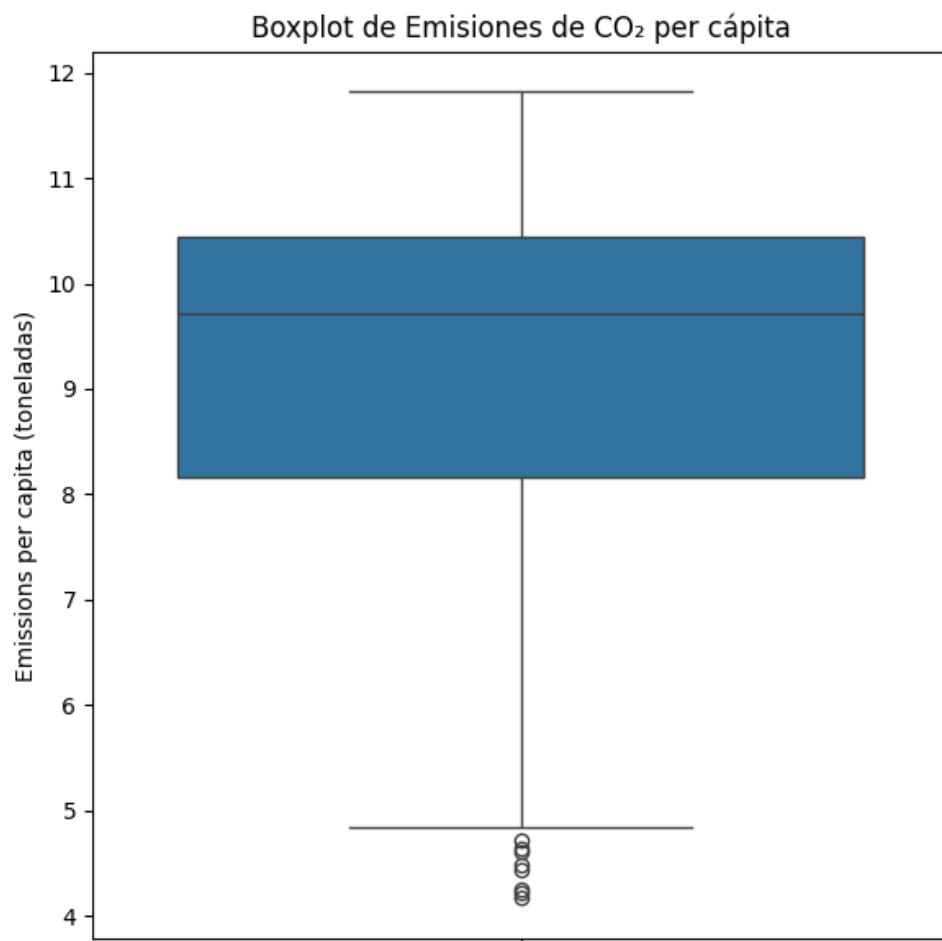
Identificación de valores atípicos

Para la detección de valores atípicos se utilizaron dos métodos distintos. Primero, se calculó el *Z-score* que identificaba como outliers aquellos puntos con $|Z| > 3$; el cual resultó sin identificar valores atípicos. Posteriormente, se hizo uso del método IQR: definimos Q_1 y Q_3 (percentiles 25 % y 75 %) que consideraba como outliers los valores por debajo de $Q_1 - 1.5 \cdot \text{IQR}$ o por encima de $Q_3 + 1.5 \cdot \text{IQR}$. Este segundo enfoque identificó principalmente registros de los años muy tempranos (1850–1853, 1855, 1858) y muy recientes (2022–2023).

Table 3. Valores atípicos detectados por el método IQR

Año	Emisiones (t/persona)	Z-score
1850	4.4892	-2.3920
1851	4.2530	-2.5148
1852	4.2160	-2.5340
1853	4.1674	-2.5593
1855	4.6458	-2.3105
1858	4.7255	-2.2691
2022	4.6031	-2.3327
2023	4.4428	-2.4161

Finalmente se decidió trabajar con estos datos, pues reflejan cambios genuinos del indicador, y no errores de medición.

**Figure 1.** Boxplot de emisiones per capita

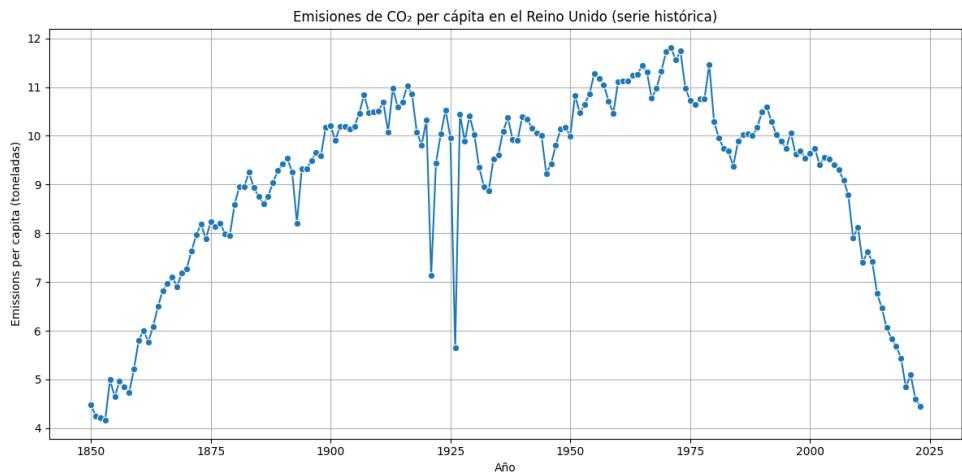


Figure 2. Visualización de la serie de tiempo

4 IDENTIFICACIÓN DEL MODELO

4.1 Análisis de componentes de la serie

Como primer paso y para entender la estructura de la serie de tiempo, se realizó una descomposición aditiva en cuatro componentes (observada, tendencia, estacionalidad y residuo).

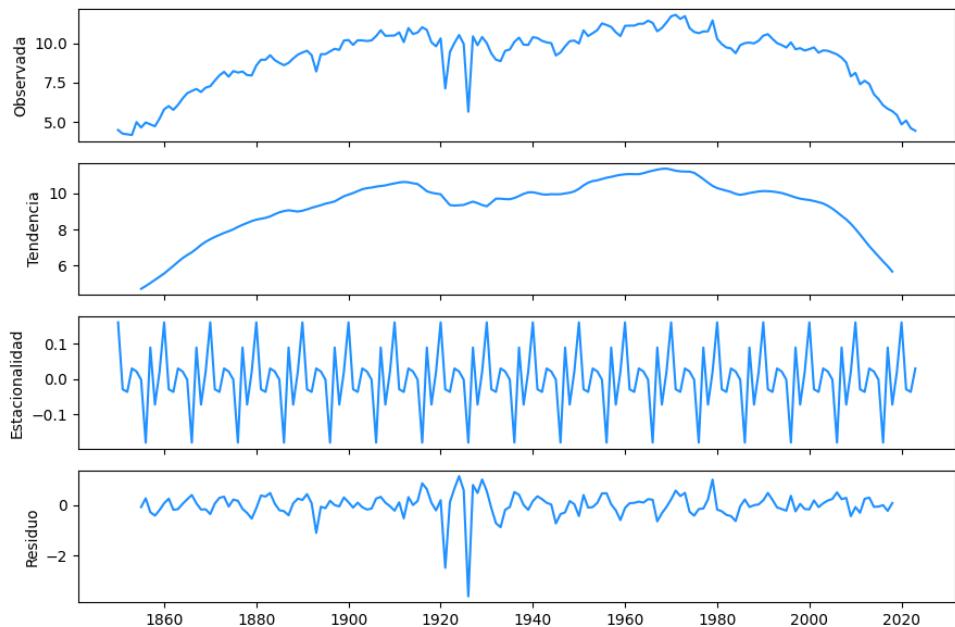


Figure 3. Descomposición de la serie de tiempo

- **Tendencia:** muestra un claro ascenso desde los años 1850 hasta 1900, seguido de un descenso pronunciado en las últimas décadas.
- **Estacionalidad:** es prácticamente nula.
- **Residuo:** refleja variaciones irregulares sin ningún patrón específico.

Una vez sabiendo esto, para la elección del modelo se graficó la Función de autocorrelación (ACF) y la Función de autocorrelación muestral (PACF).

La ACF muestra una caída lenta, característica de series no estacionarias.

La PACF tampoco presenta un corte claro tras un rezago fijo, lo que descarta de inicio un modelo puramente MA(q) o AR(p) en la serie sin transformaciones.

Además, tampoco observamos ruido blanco, lo que descarta una caminata aleatoria.

Adicionalmente, se realizó la prueba aumentada de Dickey–Fuller que arrojó un p-value mayor a 0.05 (no rechazamos H_0), confirmando la presencia de raíz unitaria y la no estacionariedad para descartar dichos modelos simples.

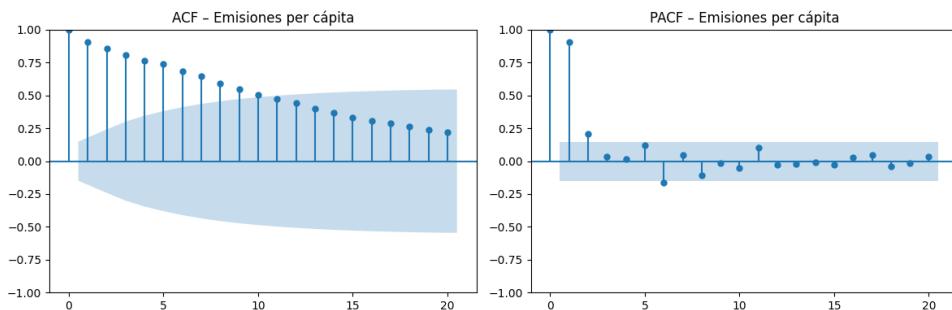


Figure 4. ACF y PACF de la serie temporal

Como paso siguiente se realizó una diferenciación $d = 1$ de la serie para eliminar la tendencia y convertirla en estacionaria. Posteriormente se grafica nuevamente la ACF y PACF sobre la serie diferenciada y se aplica la prueba ADF nuevamente.

Ahora la ACF presenta un corte abrupto tras el rezago 1, lo que sugiere que un ARMA(1,1) o ARIMA (1,1,1) sobre la serie diferenciada es un modelo plausible.

Además, decidimos descartar SARIMA ya que no existe estacionalidad y no daría mejores resultados.

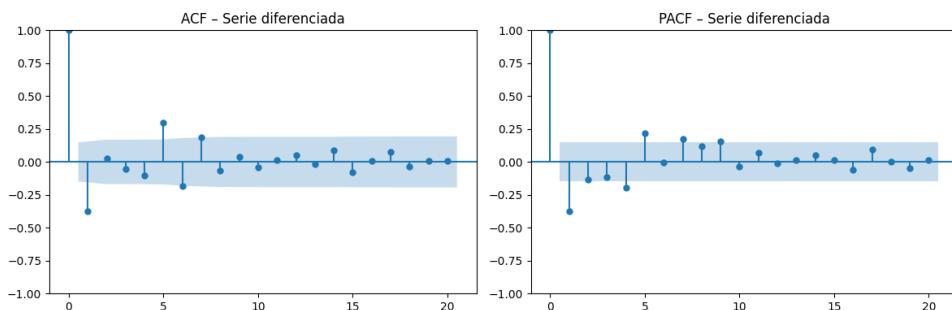


Figure 5. ACF y PACF de la serie temporal diferenciada

Finalmente, antes de continuar con algun modelo, se hace uso de la metodología de Box-Jenkins para verificar que modelo sería el ideal para tratar la serie, la cual, selecciona el modelo con el AIC (Criterio de información de Akaike) más bajo, que sirve para comparar modelos.

Esta metodología arrojó que el mejor modelo para esta serie es un ARIMA(2,1,6), con un respectivo valor AIC de 316.7914

Table 4. Valores de AIC para diferentes combinaciones de $(p, 1, q)$

p	q	AIC
2	6	316.7914
5	3	316.8026
1	5	317.0391
5	2	317.5348
6	2	317.5439
7	1	317.8247
3	6	317.8269
0	7	317.8542
2	7	318.1470
3	5	318.4564

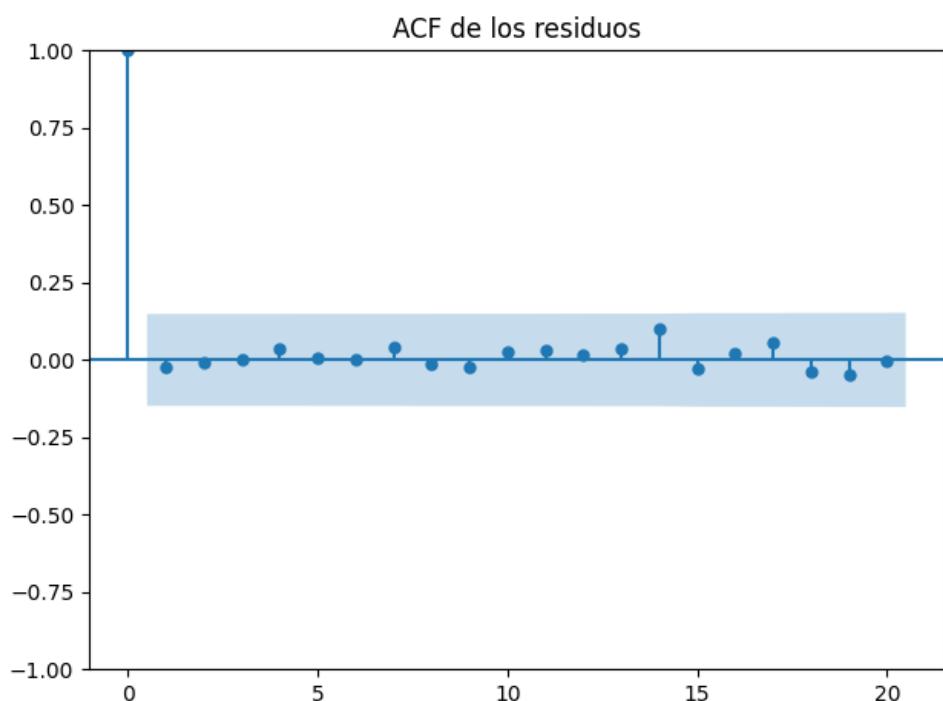


Figure 6. ACF de Residuos con ARIMA(2,1,6)

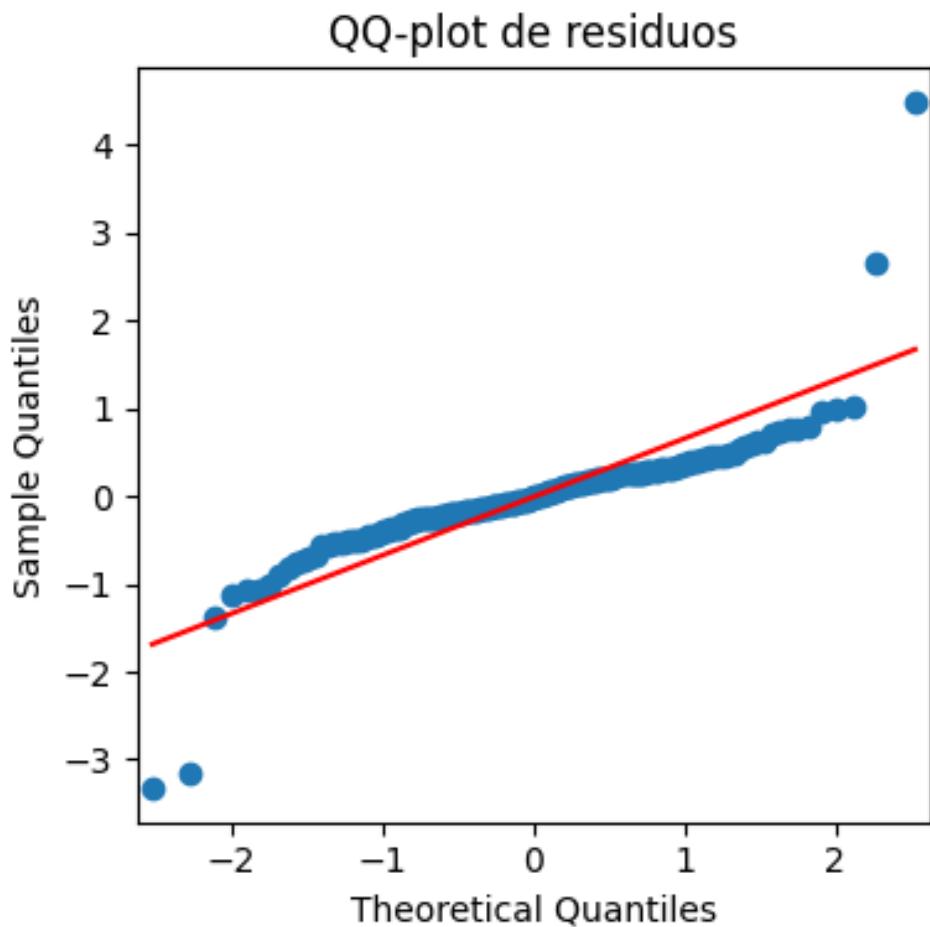


Figure 7. QQ-Plot de Residuos con ARIMA(2,1,6)

5 IMPLEMENTACIÓN Y DIAGNÓSTICO DEL MODELO

Para evaluar la precisión del modelo ARIMA(2,1,6) dividimos la serie en dos partes:

- **Training:** 80 % de las observaciones iniciales.
- **Test:** 20 % restante.

Ajustamos el ARIMA(2,1,6) sobre el conjunto de entrenamiento y calculamos las siguientes métricas de error en el test set:

- **MAE** (Error Absoluto Medio): 1.463 toneladas per cápita.
- **MAPE** (Error Porcentual Medio): 24.76 %.

A continuación, extendimos el modelo a toda la serie histórica y generamos pronósticos para los tres años posteriores al último dato observado. Los resultados, con sus intervalos de confianza al 95 %, quedan en la Tabla 5.

Table 5. Pronósticos de emisiones de CO₂ per cápita (t/persona) para 2024–2026

Año	Pronóstico	Límite inferior (95%)	Límite superior (95%)
2024	4.2640	3.1443	5.3838
2025	4.0288	2.7531	5.3044
2026	3.9803	2.5985	5.3621

Visualización de las predicciones:

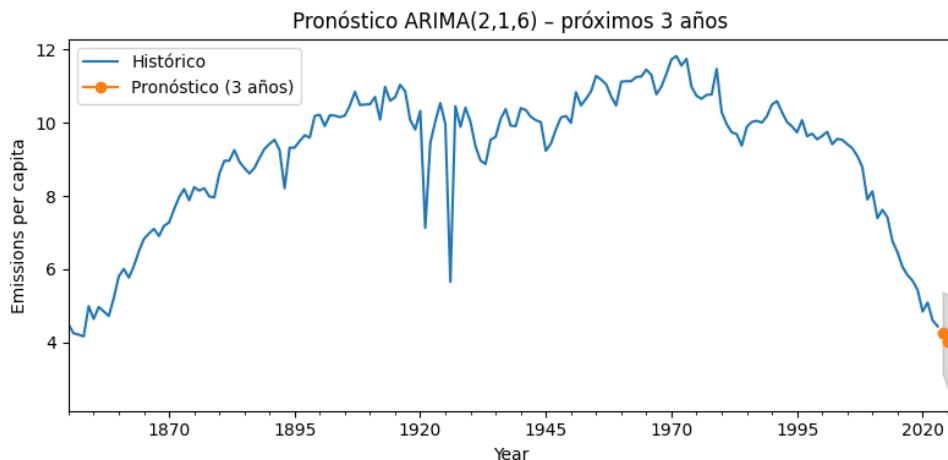


Figure 8. Pronóstico con ARIMA(2,1,6)

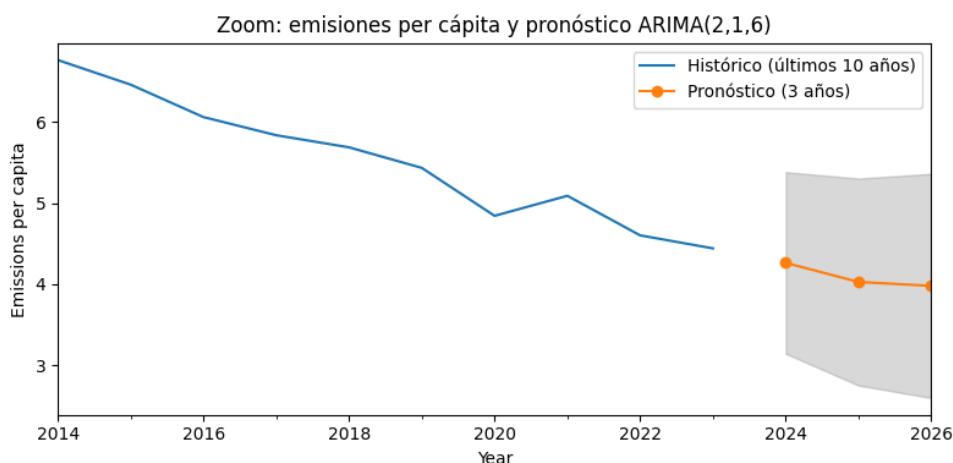


Figure 9. Pronóstico con ARIMA(2,1,6) (Zoom)

6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El pronóstico estima emisiones per cápita de aproximadamente 4.26 t en 2024, 4.03 t en 2025 y 3.98 t en 2026.

Estas cifras continúan la trayectoria descendente observada en la serie histórica del Reino Unido, reflejando la transición del país hacia fuentes de energía más limpias y otras mejoras que han reducido

la huella de carbono de este país en los últimos años, lo que lo mantiene fuertemente encaminado a cumplir con el ODS 13 "Adoptar medidas urgentes para combatir el cambio climático y sus efectos".

6.1 Recomendaciones

Aunque la trayectoria de descarbonización en Reino Unido es buena y continua decayendo, se pueden implementar algunas acciones o políticas que ayuden a acelerar este proceso y/o evitar que se vuelva a elevar el indicador en un futuro, como por ejemplo:

- **Ajustar el precio del carbono.** Subir gradualmente el precio de mercado de CO₂ para incentivar la transición a energías limpias.
- **Impulsar movilidad sostenible.** Ampliar incentivos para vehículos eléctricos, como beneficios fiscales e infraestructura para dichos vehículos.
- **Monitoreo de emisiones de CO₂** Establecer un sistema de seguimiento de emisiones de los ciudadanos, capaz de detectar si alguien está desalineado a la meta de reducir el impacto del carbono.
- **Fomentar la participación ciudadana.** Desarrollar campañas de concienciación sobre la reducción de huella de carbono en el hogar y la empresa, y promover prácticas de consumo responsable.

Estas estrategias combinan incentivos de diferentes áreas, como lo social y lo laboral para acelerar la caída de emisiones de CO₂ per cápita y asegurar el cumplimiento del ODS 13.

REFERENCES